风电场电能质量问题分析与治理措施探讨

王跃辉　梁志营　黄志强　金贝贝
华能新能源股份有限公司河北分公司　河北　石家庄　050000

摘　要：大规模风电集中接入电力系统会对电网电能质量造成多重不利影响，本文分析风电场并网运行存在电压波动与闪变谐波污染三相不平衡频率偏差四类电能质量问题，梳理风能资源风电机组特性电网结构监测管理不足等成因，从无功补偿滤波技术机组控制策略和电网规划管理等方面提出治理方案，为风电场电能质量管控和电网稳定运行提供参考。

关键词：风电场；电能质量；问题分析；治理措施

引言

风电是新能源发电的重要形式，并网规模持续扩大。受风能随机性、机组设备特性及电网条件影响，风电场并网易出现电压波动、谐波污染、三相不平衡、频率偏差等电能质量问题，影响电网安全稳定运行。本文结合风电场运行实际，分析各类电能质量问题及成因，针对性探讨对应的治理技术与管控措施，为改善风电并网电能质量提供参考

1 风电场电能质量的主要问题

1.1 电压波动与闪变

风电场电能质量问题中电压波动与闪变较为常见。风能具有随机性，风速持续变化会使风电机组输出功率不断改变，功率变化会引起并网点电压发生波动。风电场开展机组启停、投切以及故障机组切除操作时，系统功率传输状态会出现短时突变，进而引发电压闪变。电压波动和闪变会影响用电设备正常运行，长期电压扰动会加快设备老化，缩短设备使用寿命，严重情况下会造成设备损坏。精密电子装置和照明设备对电压变化敏感度高，受这类扰动影响后容易出现工作异常，使用性能下降。电网接入风电场后，需要持续监测电压波动与闪变指标，控制扰动幅度，降低风功率波动对电网侧各类负荷带来的不良影响，保障电网和用电设备稳定运行。

1.2 谐波污染

风电场谐波污染主要来自机组配套电力电子器件，变流器与变频器是谐波产生的主要设备。设备在电能变换与调节过程中会产生谐波电流，谐波电流流入公共电网，改变电网原有电压电流波形，引发波形畸变，形成谐波污染。风电场装设的无功补偿装置运行时也会产生一定谐波，多种谐波叠加会进一步恶化电网谐波水平。电网持续存在谐波会增大输电线路与电力设备损耗，降低电能传输效率。谐波作用下变压器、电容器等设备运行状态受到干扰，出现温升增加、振动加剧、噪声增大等问题，缩短设备服役时间[1]。电网内谐波信号还会对邻近通信线路和通信设备造成电磁干扰，影响电力通信与周边民用通信的信号传输稳定性，降低通信质量。风电场并网运行时需要对谐波含量进行监测控制，限制谐波注入量，减小谐波对电网一次设备与通信系统带来的不利影响。

1.3 三相不平衡

风电场三相不平衡由多种因素共同引起。风电场各风机布设位置不同，各个机位的风速和风压条件不一致，单台风电机组输出功率存在差异，造成风电场整体三相电流不平衡。风电机组长期运行产生设备故障，会造成单台或者多台机组出力异常，进一步破坏三相电流平衡。电网侧接入的单相负荷会改变三相功率分配，和风电场出力偏差叠加，加剧系统三相不平衡。三相不平衡会增加输电损耗，电力设备无法达到额定工作状态，设备利用率降低。异步电动机受三相不平衡影响较大，出现温升超标、机体振动加大等现象，持续在该工况运行会缩短设备使用寿命。严重三相不平衡会造成电网继电保护误动作，引发供电中断，对电网整体安全稳定运行带来负面影响。风电场并网运行时需要监测三相不平衡度，及时调整机组出力，控制不平衡水平，降低对电网及用电设备的影响。

1.4 频率偏差

风电场并网运行时频率偏差是典型电能质量问题，诱因是风电出力波动。风能存在随机变化特征，风电机组输出有功功率不断改变，破坏电网有功功率供需平

衡，造成系统频率偏移。电网负荷保持稳定的条件下，风电出力高于实时用电负荷，系统频率上升，风电出力低于实时用电负荷，系统频率下降。电网调频备用容量不足，调频响应速度无法匹配功率波动，会扩大频率偏差。频率偏移会影响用电设备正常工作，电动机、发电机对频率变化敏感，转速出现变动，运行参数偏离额定值，设备出力与工作效率下降。长时间未管控的频率偏差会持续恶化电网运行状态，引发频率崩溃，造成区域大面积停电，威胁电力系统整体安全稳定。

2 风电场电能质量问题产生的原因分析

2.1 风能资源的特性

风能资源本身的固有属性是造成风电场电能质量不稳定的基础性因素。风能并非稳定可控的能源，自然环境中的风力大小、持续时间都没有固定规律，整体表现出明显的随机变化、间歇出现和持续波动的特征。风电机组的发电出力完全依托风力条件开展工作，风速的大小直接决定机组的发电功率[2]。自然环境中风速会随时发生增减变化，这种动态变化会直接导致风电场整体输出功率出现起伏波动，无法保持恒定状态。风电功率的持续变动会直接传导至并网电网中，直接扰动电网的电压、频率等核心运行指标，造成各项电能质量参数出现偏移和波动，这也是风电场相较于传统火电、水电站，更容易出现各类电能质量问题的根本自然原因。

2.2 风电机组的技术特性

现代风电机组依靠电力电子变流器完成并网操作，这类装置运行时会生成谐波电流，直接干扰电网电能质量。变流器配套的控制方案同样决定机组输出特性，控制方案设置不当，会诱发电压波动与闪变等电能质量问题。风电机组仿真模型与设备参数选取是否准确，会影响机组出力特性的预判结果，进而干扰电网调度安排与系统运行。惯性常数、阻尼系数等关键参数存在偏差时，系统对扰动的响应计算结果会出现偏差，削弱电网维持频率稳定的能力。机组硬件装置与参数设置共同作用，构成风电场电能质量问题的设备层面诱因，在风电功率发生波动时，设备本身的特性会放大各类电能质量异常现象，增加电网调节压力。

2.3 电网结构和运行方式

部分接入风电场的区域电网架构偏弱，输电线路敷设距离较长，配套变压器容量达不到需求，系统功率输送能力受到限制，难以快速接纳风电场送出的电能，进而引发电压波动与频率偏差。电网运行方案设置不当同样会影响并网后的电能质量，系统调峰、调频储备容量不足，无功补偿装置布设不合理都属于常见问题。电网调峰能力不足时，其余电源侧无法快速调整出力，匹配风电功率的动态变化，电网频率偏差会持续扩大。薄弱的网架结构与不合适的运行模式叠加，降低电网对风电功率波动的接纳与调节能力，当风电出力出现变化，电网缺少足够调节手段抑制扰动，各类电能质量问题更容易显现，增大系统稳定运行的压力。

2.4 缺乏有效的监测和管理

部分风电场在电能质量管控方面投入不足，没有建立完整的在线监测体系，对应的管理手段也存在缺失。依靠现有的条件，运行人员不能持续获取准确的电能质量数据，无法实时掌握风电场并网侧的各项指标变化。当电压、谐波、频率等参数出现异常时，现场不能第一时间识别故障，也不能快速采取处置手段。电能质量相关隐患会持续累积，原本轻微的异常问题逐步发展，电能质量指标持续恶化[3]。监测体系的缺失，使得管理人员缺少可靠数据支撑，难以开展针对性分析，无法提前制定防控方案，问题反复出现，持续对并网电网产生扰动，影响风电场和电网系统的稳定运行。

3 风电场电能质量问题的治理措施

3.1 无功补偿技术

（1）静止无功补偿器（SVC）是风电场景中常用的动态无功调节设备，该装置可实时监测电网电压的动态变化，依据电压波动情况自主调整无功功率输出，能够有效管控电网电压波动与闪变问题，凭借响应速度快、无功调节区间广的特性，适配多数风电场的基础无功补偿工作，应用范围十分广泛。（2）静止同步补偿器（STATCOM）依托电力电子技术搭建运行体系，相较于传统补偿设备，该设备电压响应速度、无功调节精准度更具优势，运行过程中产生的谐波量更少，可实时跟进电网电压动态变化，快速输出适配的无功功率，稳定风电场并网后的电网电压水平，提升整体电压运行稳定性。（3）分布式无功补偿装置主要包含电容器组、电抗器组等设备，通过在风电场各区域合理布设这类设备，可根据场内局部无功供需情况开展定点补偿，优化风电场整体无功分布格局，规避无功功率长距离输送产生的能耗问题，有效降低电网运行损耗。

3.2 滤波技术

一是无源滤波器，该设备主要由电容器、电抗器、电阻器等基础无源元件构成，核心作用是针对性滤除电网中固定次数的谐波，设备整体构造简单，建设和运维成本较低，适合大规模基础谐波治理工作，但其运行性

能存在明显局限，滤波效果会直接受到电网各项运行参数的制约，设备运行期间还容易引发电网谐振故障，影响风电场电网稳定运行。二是有源电力滤波器（APF），该设备以电力电子技术为核心运行原理，属于动态谐波补偿设备，可实时检测电网内部的谐波电流数据，同步生成幅值相同、方向相反的补偿电流，以此抵消并清除电网谐波，该设备滤波性能稳定、响应速度快，运行过程不会受电网参数干扰，适配性极强，唯一短板是设备购置与投入成本偏高。三是混合滤波器，该设备整合了无源滤波器与有源电力滤波器（APF）的设备优势，运行过程中依靠无源滤波器承担大部分谐波滤除工作，同时利用有源电力滤波器（APF）弥补无源滤波设备的残留谐波问题，优化整体滤波性能，该技术方案在保障风电场谐波治理效果的基础上，有效控制了设备投入成本，具备良好的工程应用价值和推广空间。

3.3 优化控制策略

针对风电机组运行控制问题，可通过调整机组控制方式提升整体运行效果与并网供电水平。将 MPPT 最大功率点跟踪控制技术与有功、无功解耦控制方式相结合，能够改善风电机组日常运行状态，提升风能利用效率，优化输出电能的各项指标，保障供电稳定性。在电网异常工况下，通过规范设置风电机组 LVRT 低电压穿越、HVRT 高电压穿越相关参数与运行逻辑，可让机组在电网电压骤升、骤降等故障场景下维持不间断运行，有效提升机组电网故障耐受能力，降低风电设备故障脱网对电网运行造成的扰动与冲击[4]。针对规模化大型风电场集群的运行管控需求，可采用集中式与分布式两类集群控制模式，完成风电场整体有功功率、无功功率的统一协调管控。依托精细化的集群出力分配优化方式，合理调配各机组发电出力，平衡风电场整体发电输出，削弱风电随机性、波动性带来的并网影响，有效提升风电场与电力电网的适配协同运行能力，保障风电并网后电网整体的运行稳定性与安全性。

3.4 加强电网规划与管理

一是优化电网整体结构规划，立足区域风电场实际分布情况与出力特性，针对性开展风电并网电网专项规划工作，科学布置配套输电线路与变电站设备，有效提升电网电力输送容量与运行稳定性。同时推进电网网架互联互通建设，完善电网整体架构，提升电网调峰、调频核心能力，从硬件层面提升电网对风电电力的接纳与消纳水平，解决风电并网消纳不足的问题。二是健全风电电能质量监测体系，全面搭建规范化、系统化的风电场电能质量监测机制，配套布设高精度专业监测设备，对风电场运行过程中的电压、电流、频率、谐波等关键电能指标进行全天候实时监测。依托监测所得的真实数据开展统计分析与问题研判，精准排查风电并网运行中存在的电能质量隐患，为后续开展电能治理、设备调整等工作提供可靠的数据支撑。三是落实常态化电网运行管理工作，结合电网与风电场运行特点，制定科学可行的电网运行方案和电力调度机制，保障电网整体安全稳定运行。严格落实风电场并网管理要求，严格执行风电并网相关技术规范与标准，标准化管控风电场日常运行、设备维护等各项工作，从管理层面持续提升风电场并网后的整体电能质量。

结束语

综上所述，风电出力的随机性、设备特性及电网条件等因素，易引发电压波动、谐波污染、三相不平衡、频率偏差等电能质量问题，影响电网安全稳定的运行。通过应用无功补偿、谐波滤波等技术手段，优化机组控制策略，完善电网规划与监测管理体系，可有效改善风电并网电能质量，削弱风电波动对电网的扰动，助力风电产业平稳发展与电力系统安全高效运行。

参考文献

[1] 傅振鹤, 柳云祥. 风电场大规模接入电力系统的电能质量分析 [J]. 能源新观察,2025,(9):61-62.

[2] 胡光南. 风电场升压站安全运行管控措施探讨 [J]. 现代工业工程,2026,(11):25-27.

[3] 徐弈. 风电场并网对电网电能质量的影响及治理措施 [J]. 通信电源技术,2024,41(1):37-40.

[4] 朱建华, 孙闯, 袁玉睢, 等. 配储投入对风电场电能质量影响分析 [J]. 青海电力,2026,45(2):1-6.